短期秸秆不同还田方式对土壤结构和水分影响

周彦莉[1,2,3]， 吴海梅[1,2,3]， 周彦栋[1,3,4]， 尚旭民[1,2,3]， 逄 蕾[1,2,3]

（1. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室，甘肃 兰州 730070；2. 甘肃农业大学农学院，甘肃 兰州 730070；3. 甘肃农业大学植物生产类实验教学中心，甘肃 兰州 730070；4. 甘肃农业大学食品科学与工程学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要：通过大田试验和蒸发桶模拟试验，分析了短期秸秆不同还田方式对土壤结构和水分蒸发的影响。设对照（CK）、碎秆还田（T1）、碎秆还田+整秆覆盖（T2）和整秆覆盖（T3）4种处理。研究发现：（1）0~20 cm土层，T1、T2和T3均能降低土壤容重，增大土壤毛管孔隙度，但对团聚体影响差异较大，T1和T2大团聚体含量比CK显著增加36.90%和63.06%（$P<0.05$），T3比CK降低9.89%。（2）T1、T2和T3均能提高0~60 cm土层土壤平均含水量，降低土壤水分累积蒸发量。T3的累计蒸发量最小，T2和T3之间差异不显著，与CK相比，其抑制水分蒸发率分别是3.65%和4.13%。（3）碎秆还田+整秆覆盖对改良土壤结构和抑制土壤水分蒸发效果最佳。

关键词：秸秆碎秆还田；秸秆整秆覆盖；土壤物理结构；土壤水分蒸发

土壤水分是限制农业生产的主要因素[1]，土壤水分受到土壤容重、土壤孔隙度和土壤团聚体等物理性状的影响。秸秆还田对土壤结构和土壤含水量影响较大，对于秸秆还田的研究，多是建立在长期试验之上，研究表明，秸秆还田具有改良土壤结构，降低土壤水分蒸发，提高土壤水分利用效率[2-3]等作用。也有短期试验表明，短期秸秆还田同样对土壤水分和结构有较大影响，不同还田方式是影响土壤结构的关键因素[4-5]。秸秆整秆深还田、整秆覆盖还田、碎秆翻埋还田和碎秆覆盖还田均能显著降低土壤容重，增加土壤孔隙度[6]，促进微团聚体向大团聚体的转化，水稳性团聚体稳定性显著增强，土壤持水能力增大[7]。秸秆整秆和碎秆覆盖还田，其覆盖地表的秸秆形成隔层，显著降低土壤水分蒸发，减缓土壤水分波动，提高了土壤水分利用率[8-10]。浅层秸秆还田对0~20 cm土层土壤含水量影响最显著[11-12]，秸秆深还田对水土保持效果更好[13]。但部分干旱地区秸秆翻埋和打碎还田反而促进土壤蒸发，降低土壤含水量[4,14]。秸秆覆盖虽能提高土壤水分入渗和持水能力，但秸秆覆盖量过大不仅会造成外来水分入渗受阻，而且会降低地温、影响农作物播种和种子出苗率；甚至造成因覆盖量过大秸秆不易风化而焚烧的现象[15]。随着农业资源的循环利用，秸秆还田措施逐渐被推广，深入研究合理的秸秆还田量及还田方式对改善土壤结构，减少土壤水分蒸发具有重要的意义。

西北半干旱和干旱地区受自然因素和人为因素的影响，部分土壤退化、土壤结构和蓄水能力等性能减弱[16-17]。如何降低土壤水分蒸发、改良土壤物理结构和促进农业资源高效利用，是该地区亟需解决的关键问题。合理的秸秆还田方式和还田量是改善土壤物理结构和提高土壤蓄水保墒能力的重要途径，适量秸秆还田，不仅易于风化，易于次年翻耕入土，而且收获的秸秆可以继续还田，在短期内实现秸秆资源高效利用。

本试验采用大田试验结合蒸发桶试验研究秸秆不同还田方式对土壤物理结构、蒸发特性及土壤剖面含水量的影响，明确不同方式秸秆短期还田对

收稿日期：2021-08-23； **修订日期：**2021-12-31

基金项目：国家自然科学基金项目（32160525）；甘肃省自然科学基金（20JR5RA034）；甘肃省高等学校创新基金项目（2020B125）；研究生重点课程建设项目（GSAU-ZDKC-1909）；盛彤笙创新基金（GSAU-STS-1736）；甘肃农业大学省级大学生创新创业训练计划项目（S202110733006）

作者简介：周彦莉（1995-），女，在读研究生，主要从事覆盖栽培对土壤生态影响的研究. E-mail: 3412726712@qq.com

通讯作者：逄蕾. E-mail: pangl@gsau.edu.cn

土壤物理性质和水分蒸发的影响,以期充实西北半干旱和干旱地区秸秆还田在改良土壤结构、降低土壤水分蒸发,实现秸秆高效利用方面的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区设在甘肃省白银市白银区水川镇(36°37′N,104°29′E)农业信息化科普小院甘肃农业大学试验基地,海拔1509 m。年平均气温7.9 ℃,无霜期161 d左右,冬冷夏热,昼夜温差较大,属于温带大陆性气候。日照时数长,年均日照时数2534 h,热量资源丰富。干旱少雨,蒸发量大,年均蒸发量2004 mm,年均降水量204 mm,7—9月的降雨量约占全年总降雨量的60%左右。土壤为沙壤土,容重1.39 $g\cdot cm^{-3}$。

1.2 试验设计

试验设4个处理,CK(对照:无秸秆)、T1[碎秆还田:玉米秸秆粉碎至2~3 cm后翻埋入土,秸秆用量约为9000 $kg\cdot hm^{-2}$(风干基),是每公顷产出的全部玉米秸秆]、T2(碎秆还田+整秆覆盖:秸秆用量同T1,玉米秸秆50%粉碎至2~3 cm后翻埋入土,另50%保持整秆状态覆盖于地表)和T3(整秆覆盖:秸秆用量同T1,玉米整秆覆盖于地表)。

采用大田试验和蒸发桶观测试验相结合的方法[18]开展本研究,大田试验持续时间为92 d、蒸发桶观测试验持续时间为22 d。大田试验和蒸发桶试验每个处理重复3次,蒸发桶与大田试验小区相间排布,在试验区搭建干旱遮雨棚以防降雨淋湿。试验持续期间的温度为5.5~28.5 ℃。

1.2.1 大田试验 小区面积3 m×2.5 m,完全随机区组排列。小区初始土壤含水量为1.5%~2%,土壤下方100 cm处铺设砂石垫层,防止地下水干扰,用隔水材料阻断水分横向传输。各处理秸秆碎秆翻埋入耕层(约20 cm)后,一次性灌水100 mm,待水分下渗至稳定状态后,用秸秆整秆覆盖地表,并测定土壤含水量,记为起始含水量。试验时间从2021年4月11至7月11日。

1.2.2 蒸发桶试验 桶高31 cm,直径22 cm,底部有1 cm大小均匀的孔,桶底垫纱布,装入过2 mm筛的土高15 cm,每桶注水至桶底渗出,静置12 h水渗流基本完成后将桶底密封,添加秸秆方式同大田,称重记录初始重量。试验时间从2021年4月11日至5月2日。

1.3 测定指标与计算方法

1.3.1 大田试验

(1) 土壤剖面含水量[18]:分别在试验开始的第1 d、第31 d、第62 d和第92 d,用TPGSQ-4土壤剖面水分速测仪测定土壤0~5 cm、5~15 cm、15~20 cm、20~40 cm、40~50 cm、50~60 cm和60~80 cm土层的土壤水分变化。

(2) 土壤容重和孔隙度[19]:试验开始后的第92 d在各处理随机选择5个样点,用环刀取0~20 cm土层的原状土烘干后,计算土壤容重。

土壤总孔隙度=(1-土壤容重/土壤比重)×100%(土壤比重取值为2.65 $g\cdot cm^{-3}$)

土壤毛管孔隙度=田间最大持水量-萎蔫含水量

非毛管孔隙度=土壤总孔隙度-土壤毛管孔隙度

(3) 团聚体:试验开始后第92 d在各处理随机选择5个样点,用环刀法采集0~20 cm土层原状土,放入硬质塑料盒内带回实验室,去除杂物后,按自然结构裂隙掰为约1 cm大小的土块,自然风干,用湿筛法测定粒径>5 mm,2~5 mm,1~2 mm,0.5~1 mm,0.25~0.5 mm和<0.25 mm的水稳性团聚体含量,并计算平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和不稳定性团粒指数(ELT),表征土壤团聚体特性[20]。

土壤团聚体MWD、GMD和ELT的计算公式如下:

$$MWD=\frac{\sum_{i=1}^{n}\bar{x}_i w_i}{\sum_{i=1}^{n}w_i} \quad (1)$$

$$GMD=\exp\left[\frac{\sum_{i=1}^{n}w_i\ln\bar{x}_i}{\sum_{i=1}^{n}w_i}\right] \quad (2)$$

$$ELT=(M_Z-M_{R>0.25})/M_Z\times100\% \quad (3)$$

式中:n为粒径分组组数;$\bar{x}_i$为i粒级分组团聚体的平均直径;w_i为i粒级团聚体的质量分数;M_z为团聚体总质量(g);$M_{R>0.25}$为粒径大于0.25 mm的团聚体质量(g)。

1.3.2 蒸发桶试验

(1) 日蒸发量:每日18:00用感度为0.01 g的电

子天平称蒸发桶质量，换算成蒸发量。

（2）土壤累计蒸发与时间的关系：用Gardner拟合曲线[21]，其计算公式如下：

$$E = at^{b} \tag{4}$$

$$v = \mathrm{d}E/\mathrm{d}t = abt^{(b-1)} \tag{5}$$

式中：t 为时间；E 为累积蒸发量；a 和 b 为拟合曲线参数；v 为土壤水分蒸发速率。

1.4 数据处理

用Excel和SPSS 20.0对数据进行统计分析，LSD法进行单因素方差分析，显著性水平为0.05，Excel绘图。

2 结果与分析

2.1 秸秆不同还田方式对土壤结构的影响

2.1.1 对土壤容重和孔隙度的影响　秸秆不同还田方式均能降低0~20 cm土层土壤容重、增加总孔隙度和毛管孔隙度。由表1可知，各处理容重CK>T3>T2>T1。T1、T2和T3比CK分别降低了5.6%、4.5%和3.3%，其中T1、T2和T3之间土壤容重差异不显著（$P < 0.05$）。T1的总孔隙度比CK显著增加了7.3%，而T2和T3对土壤的总孔隙度没有显著影响（$P < 0.05$）。T1、T2和T3比CK的毛管孔隙度分别增加了34.3%、22.7%和8.1%，其中CK和T3之间差异不显著（$P < 0.05$）。T1和T2与CK相比，显著减少了0~20 cm土层的非毛管孔隙度。

2.1.2 对土壤水稳性团聚体组成及稳定性的影响　秸秆不同还田方式显著促进土壤大团聚体的形成，且秸秆粉碎还田对促进土壤大团聚体形成效果优于秸秆整秆覆盖。由图1可知，T1、T2和T3 > 5 mm的土壤水稳性团聚体含量分别为23.30%、23.08%和13.40%，显著增加了土壤水稳性大团聚体含量。T1和T2比CK显著增加2~5 mm的水稳性团聚体含量，分别增加了36.90%和63.06%（$P < 0.05$），而T3比CK降低了9.89%，二者之间差异不显著（$P < 0.05$）。

秸秆不同还田方式均能提高土壤水稳性团聚体的稳定性。由表2可知，T1、T2和T3的MWD值分别比CK高122.35%、123.53%和55.29%，GMD值分别比CK高51.55%、48.45%和17.53%。T1、T2和T3的ELT值分别比CK低31.66%、34.15%和15.38%。即T1、T2和T3的平均重量直径和几何平均直径比CK显著增大（$P < 0.05$），不稳定性团粒指数显著降低（$P < 0.05$），其中，T2处理提高土壤水稳性团聚体稳定性的作用最大。

2.2 秸秆不同还田方式对土壤水分蒸发的影响

2.2.1 对土壤蒸发强度的影响　秸秆不同还田方式均能抑制土壤日蒸发量，其中整秆覆盖处理抑制蒸发效果最好。由蒸发桶试验可知（图2），CK、T1、T2和T3的日蒸发量随时间的增加呈下降趋势。前7 d T2和T3日蒸发量均比CK和T1小，之后二者日蒸发量随总体含水量的下降而快速下降，但相比CK，T1，T2和T3日蒸发量较大。试验期间，第1 d小雨，空气湿度较大，T1、T2和T3的日蒸发量较小，但比CK分别低21.2%、51.5%和58.8%；第4 d降温，各处理日蒸发量骤降；第22 d，T1、T2和T3的日蒸发量比CK分别高10.5%、130.3%和253.7%，即秸秆还田方式对抑制水分蒸发有显著效果。

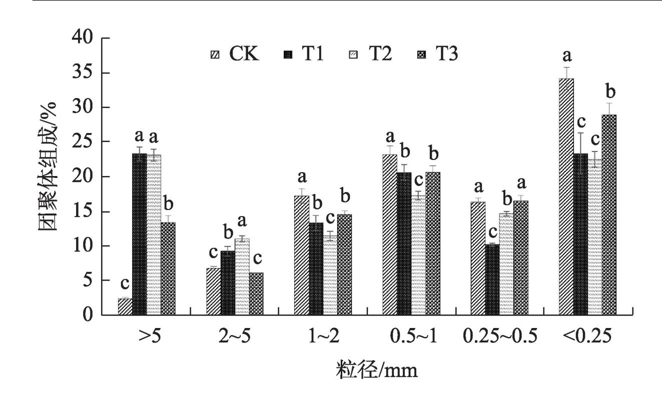
2.2.2 对土壤累积蒸发量的影响　秸秆还田对土壤累积蒸发量的影响呈先快速增加后逐渐变缓的趋势，相同时间内不同秸秆还田方式均比对照蒸发量小。由图3可知，各处理前15 d蒸发量都较大，之后蒸发量减少，趋势线逐渐趋于平缓。至试验结束时，CK的累积蒸发量为21.28 mm，T1比CK的累积

表1 秸秆不同还田方式对土壤容重和孔隙度的影响

Tab. 1 Effects of different straw returning methods on soil bulk density and porosity

处理	土壤容重/(g·cm^{-3})	土壤孔隙度/%		
		总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度
CK	1.39±0.03a	47.70±1.30b	19.19±0.64c	28.51±1.38a
T1	1.31±0.02b	50.63±0.69a	25.77±0.68a	24.86±0.93b
T2	1.32±0.04ab	50.07±1.49ab	23.55±1.28b	26.52±2.05ab
T3	1.34±0.04ab	49.41±1.58ab	20.75±1.24c	28.66±1.18a

注：小写字母表示在0.05水平下差异显著。下同。



注:小写字母表示在0.5水平下差异显著。

图1 秸秆不同还田方式对水隐性团聚体分布的影响

Fig. 1 Effects of different straw returning methods on the distribution of water-stable aggregates

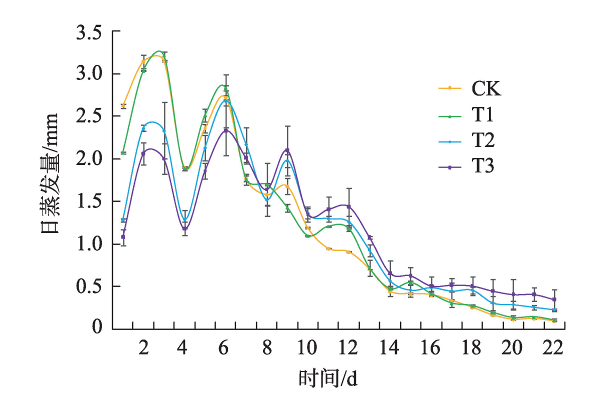


图2 秸秆不同还田方式对土壤蒸发强度的影响

Fig. 2 Effects of different straw returning methods on soil evaporation intensity

表2 不同处理下土壤水稳性团聚体稳定性指标

Tab. 2 Soil water stable aggregate stability indexes in different treatments

处理	MWD/mm	GMD/mm	ELT/%
CK	0.85±0.03c	0.97±0.01c	34.14±1.63a
T1	1.89±0.08a	1.47±0.04a	23.33±2.96c
T2	1.90±0.02a	1.44±0.01a	22.48±1.14c
T3	1.32±0.04b	1.14±0.03b	28.89±1.77b

蒸发量小0.63%,T2和T3在地表形成秸秆隔层,与CK相比,其抑制水分蒸发率分别是3.65%和4.13%。

T1、T2和T3对土壤累积蒸发量与时间的关系用Gardner曲线拟合,拟合参数见表3。Gardner拟合曲线与实测曲线的相关系数R^2均在0.93以上,达到显著水平,表明Gardner拟合数据与实测数据吻合,这4种秸秆还田方式土壤累积蒸发量和时间的关系可以用Gardner拟合曲线模拟土壤水分蒸发全过

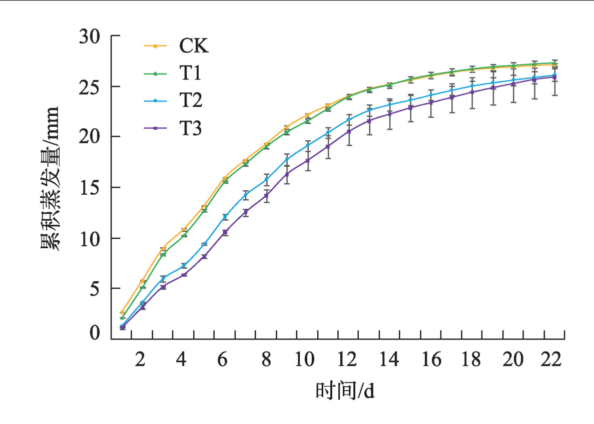


图3 秸秆不同还田方式对土壤累积蒸发量的影响

Fig. 3 Effects of different straw returning methods on soil evaporation

表3 秸秆不同还田方式累积蒸发量E与时间t的回归关系

Tab. 3 Regression relationship between cumulative evaporation (E) and time (t) under different straw returning methods

处理	E拟合参数		R^2	ab	b−1
	a	b			
CK	3.806	0.705	0.940	2.683	−0.295
T1	3.223	0.767	0.935	2.472	−0.233
T2	1.978	0.916	0.953	1.812	−0.084
T3	1.602	0.977	0.966	1.565	−0.023

程。由方程可知,土壤水分蒸发速率与系数a、b和b−1相关。从表中ab的值可知,各处理土壤水分蒸发速率大小为:CK>T1>T2>T3,与图1各处理日蒸发量趋势相一致。

2.3 秸秆不同还田方式对土壤剖面含水量的影响

秸秆不同还田方式主要影响0~60 cm土层的土壤剖面含水量,0~20 cm土层的土壤含水量受4种处理的影响最显著。由图4可知,T1、T2和T3对0~20 cm土层的土壤含水量影响最大,试验第1 d 0~20 cm土层土壤含水量为:T2>T1>T3>CK;第20 d后各处理0~20 cm土层土壤含水量基本上是T3>T2>CK>T1。整个试验期间0~20 cm土层CK的平均含水量为16.8%,T1、T2和T3比CK分别高2.20%、14.70%和20.60%,CK、T1、T2及T3在0~60 cm土层土壤平均含水量最大,分别为20.24%、21.18%、21.22%和21.88%,其中T2和T3比CK显著增高了0.98%和1.64%。

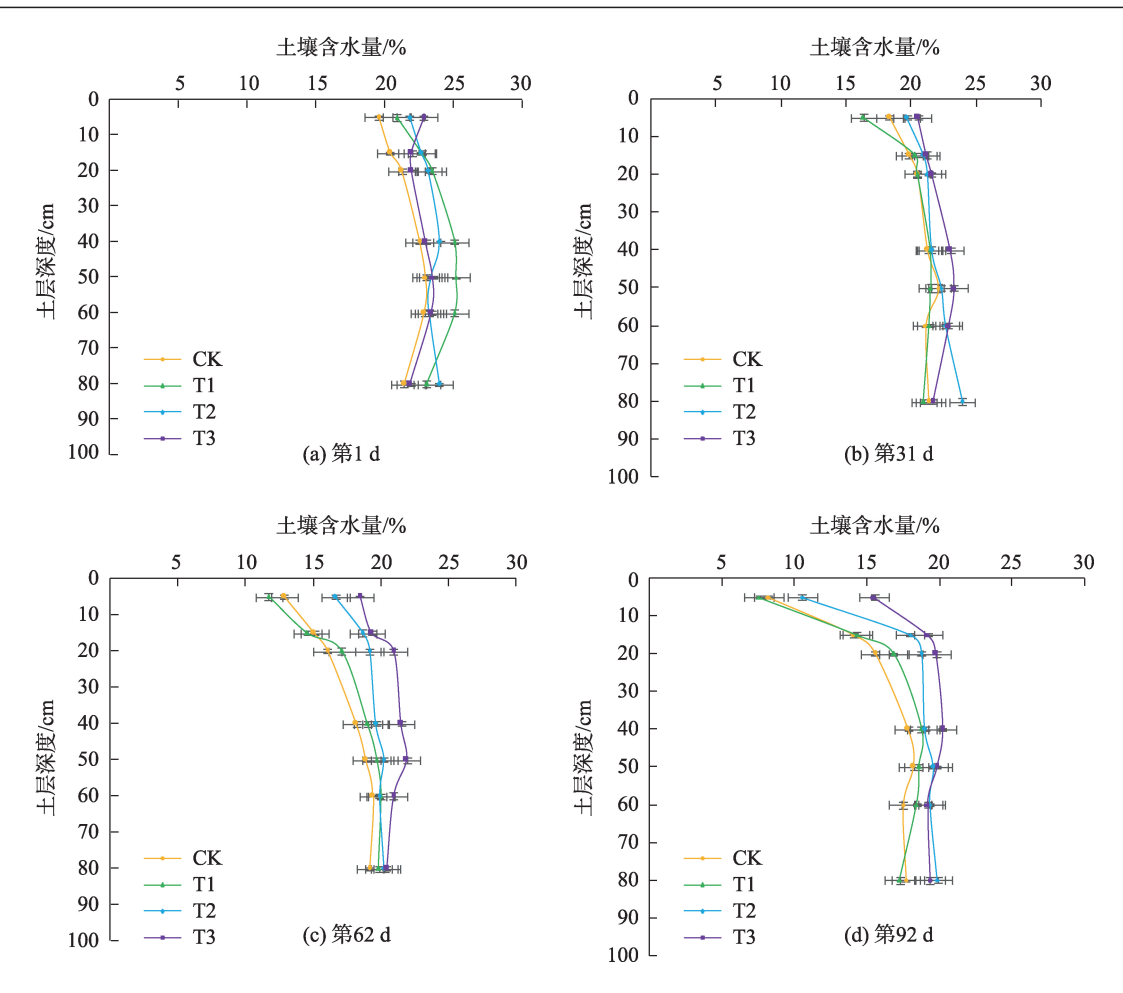


图4 秸秆不同还田方式对土壤剖面含水量的影响

Fig. 4 Effects of different straw returning methods on soil water content

3 讨 论

关于秸秆还田研究,前人主要从长期秸秆还田的角度证实,秸秆还田能改良土壤物理结构[22],增加秸秆残留,增大土壤孔隙,提高土壤导气性,使土壤固-液-气三相结构趋于合理[23]。也有短期研究表明,秸秆还田对改良土壤结构影响较大。本研究通过短期试验,研究秸秆不同还田方式对土壤结构和水分影响,结果也表明,碎秆还田、碎秆还田+整秆覆盖对降低土壤容重、增大土壤孔隙作用较大,且碎秆还田量越大该作用越大。同时研究结果也表明碎秆还田、碎秆还田+整秆覆盖和整秆覆盖均能降低0~20 cm土层土壤的微团聚体含量(粒径<0.25 mm),提高水稳性团聚体的稳定性[24-25],且碎秆还田+整秆覆盖处理的效果最显著,这主要是因为土壤中混入打碎的秸秆起到"楔子"的作用,改善了土壤的物理结构,优化了土壤三相比[26];秸秆覆盖有效改善土壤-大气界面微环境水热交换状况,促进土壤结构体的形成,增强土壤蓄水能力[27]。

秸秆还田对0~20 cm土层土壤水分影响最显著,通过短期模拟试验,可以探究其对土壤耕层水分的影响。本试验中碎秆还田处理0~20 cm土层的土壤孔隙度增大,影响了土壤水分蒸发,碎秆还田与对照相比土壤水分蒸发的差异不显著,碎秆还田+整秆覆盖和整秆覆盖更有利于抑制土壤水分的蒸发。本试验结果表明,碎秆还田+整秆覆盖抑制水分蒸发与整秆覆盖差异不显著。秸秆覆盖于地表,形成土壤-秸秆-大气隔层,土壤水分蒸发受隔层的阻碍,延缓蒸发速率[28],对土壤水分保持有很大作用。碎秆还田、碎秆还田+整秆覆盖和整秆覆盖在0~60 cm土层平均含水量较高,陈素英等[11]的研究也印证了这一点。员学峰等[29]研究发现,秸秆覆盖影响和保持土壤含水量在0~50 cm土层,与本试验研究结果略有差异,可能与土质和气候条件有

关。本试验进行时间较短,后期试验还需增加不同处理,延长观测时间,另外对土壤深层水分变化需进一步研究,以获得最佳秸秆还田方式和还田量,改善土壤物理特性和抑制水分蒸发。

4 结 论

本试验通过研究秸秆短期不同还田方式对土壤结构和水分蒸发的影响,结合数学模型模拟,发现秸秆不同还田方式对改良土壤结构和抑制水分蒸发影响差异较大,得出以下结论:

(1) 碎秆还田和碎秆还田+整秆覆盖能显著降低0~20 cm土层土壤容重,增大土壤孔隙度,提高土壤水稳性团聚体稳定性,促进大团聚体的形成。

(2) 秸秆还田能提高0~60 cm土层土壤平均含水量,降低土壤水分累积蒸发量,其中整秆覆盖抑制蒸发的效果显著。

(3) 秸秆碎秆还田能有效改良土壤物理结构,秸秆整秆覆盖能有效降低土壤水分蒸发,秸秆碎秆还田+秸秆整秆覆盖的效果兼具二者优缺点,既要改良土壤结构又要抑制土壤水分蒸发时,秸秆碎秆还田+秸秆整秆覆盖效果最优,是最佳选择。

参考文献(References):

[1] 赵聚宝, 梅旭荣, 薛军红, 等. 秸秆覆盖对旱地作物水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 1996, 29(2): 59-66. [Zhao Jubao, Mei Xurong, Xue Junhong, et al. The effects of straw mulch on crop water use efficiency in dryland [J]. Scientia Agricultura Sinica, 1996, 29(2): 59-66.]

[2] 董建新, 丛萍, 刘娜, 等. 秸秆深还对黑土亚耕层土壤物理性状及团聚体分布特征的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(4): 921-934. [Dong Jianxin, Cong Ping, Liu Na, et al. Effects of deep straw incorporation on subsoil physical properties and aggregate distribution in black soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(4): 921-934.]

[3] 王紫薇, 黄来明, 邵明安, 等. 青海高寒区不同土地利用方式下土壤持水能力及影响因素[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1722-1730. [Wang Ziwei, Huang Laiming, Shao Mingan, et al. Soil water holding capacity and its influencing factors under different land use patterns in alpine region of Qinghai Province[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1722-1730.]

[4] 王珍, 冯浩. 秸秆不同还田方式对土壤入渗特性及持水能力的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 75-80. [Wang Zhen, Feng Hao. Effects of different straw returning methods on soil infiltration characteristics and water holding capacity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(4): 75-80.]

[5] 白秀梅, 张垚, 张勇, 等. 液膜覆盖对旱地土壤结构特征及入渗性能的影响[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 665-671. [Bai Xiumei, Zhang Zhuang, Zhang Yong, et al. Effects of liquid film mulching on soil structure and infiltration performance in dryland[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 665-671.]

[6] 刘继龙, 李佳文, 周延, 等. 秸秆覆盖与耕作方式对土壤水分特性的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 333-339. [Liu Jilong, Li Jiawen, Zhou Yan, et al. Effects of straw mulching and tillage on soil water characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 333-339.]

[7] 田慎重, 王瑜, 李娜, 等. 耕作方式和秸秆还田对华北地区农田土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(22): 7116-7124. [Tian Shenzhong, Wang Yu, Li Na, et al. Effects of tillage methods and straw returning on distribution and stability of soil water-stable aggregates in North China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(22): 7116-7124.]

[8] Wang X, Jia Z, Liang L. Effect of straw incorporation on soil moisture, evapotranspiration, and rainfall-use efficiency of maize under dryland farming[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 69(5) : 449-455.

[9] 戚颖, 李铁男, 白雪峰, 等. 秸秆覆盖对寒旱区农田土壤理化性状的影响[J]. 东北农业大学学报, 2021, 52(7): 56-63. [Qi Ying, Li Tienan, Bai Xuefeng, et al. Effects of straw mulching on soil physical and chemical properties in cold and arid areas[J]. Journal of Northeast Agricultural University , 2021, 52(7): 56-63.]

[10] 苗芳芳, 勉有明, 普雪可, 等. 耕作覆盖对宁南旱区土壤团粒结构及马铃薯水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(11): 2366-2376. [Miao Fangfang, Mian Youming, Pu Xueke, et al. Effects of tillage and mulching on soil aggregate structure and potato water use efficiency in ningnan arid region[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(11): 2366-2376.]

[11] 陈素英, 张喜英, 裴冬, 等. 玉米秸秆覆盖对麦田土壤温度和土壤蒸发的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 171-173. [Chen Suying, Zhang Xiying, Pei Dong, et al. Effects of maize straw mulching on soil temperature and soil evaporation in wheat field [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(10): 171-173.]

[12] 汪海娇, 田丽慧, 张登山, 等. 青海湖东沙地不同植被恢复措施下土壤水分变化特征[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 76-86. [Wang Haijiao, Tian Lihui, Zhang Dengshan, et al. Characteristics of soil moisture variation under different vegetation restoration measures in the sandy land of east Qinghai Lake[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 76-86.]

[13] 贺云锋, 沈海鸥, 张月, 等. 黑土区坡耕地不同秸秆还田方式的水土保持效果分析[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 89-94. [He Yunfeng, Shen Hai'ou, Zhang Yue, et al. Analysis of soil and water conservation effect of different straw returning methods on sloping farmland in black soil area[J]. Journal of Soil and Water Con-

servation, 2020, 34(6): 89–94.]

[14] 赵晓涵, 张方敏, 韩典辰, 等. 内蒙古半干旱区蒸散特征及归因分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1614–1623. [Zhao Xiaohan, Zhang Fangmin, Han Dianchen, et al. Characteristics and attribution analysis of evapotranspiration in semi-arid region of Inner Mongolia[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1614–1623.]

[15] 郝展宏, 沙野, 米国华. 东北地区玉米秸秆覆盖技术应用现状与对策[J]. 玉米科学, 2021, 29(3): 100–110. [Hao Zhanhong, Sha Ye, Mi Guohua. Application status and countermeasures of maize straw mulching technology in Northeast China[J]. Journal of Maize Sciences, 2021, 29(3): 100–110.]

[16] 李昂, 高天鹏, 张鸣, 等. 西北风蚀区植被覆盖对土壤风蚀动态的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 120–123. [Li Ang, Gao Tianpeng, Zhang Ming, et al. Effect of vegetation cover on soil wind erosion dynamics in Northwest wind erosion region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(6): 120–123.]

[17] 赵鹏, 朱淑娟, 段晓峰, 等. 民勤绿洲边缘阻沙带表层土壤粒度空间分布特征[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1335–1345. [Zhao Peng, Zhu Shujuan, Duan Xiaofeng, et al. Spatial distribution characteristics of surface soil grain size in sand-blocking zone of minqin oasis[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 1335–1345.]

[18] 刘超, 汪有科, 湛景武, 等. 秸秆覆盖量对农田土面蒸发的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(5): 448–451. [Liu Chao, Wang Youke, Zhan Jingwu, et al. Effects of straw mulching on soil evaporation[J]. Chinese Agricultural Bulletin, 2008, 24(5): 448–451.]

[19] 张航, 徐明岗, 张富仓, 等. 陕西农业土壤持水性能及其与土壤性质的关系[J]. 干旱地区农业研究, 1994, 12(2): 32–37. [Zhang Hang, Xu Minggang, Zhang Fucang, et al. Relationship between water holding capacity and soil properties of agricultural soil in Shaanxi Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1994, 12(2): 32–37.]

[20] 林洪羽, 周明华, 张博文, 等. 生物炭及秸秆长期施用对紫色土坡耕地土壤团聚体有机碳的影响[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(1): 96–103. [Lin Hongyu, Zhou Minghua, Zhang Bowen, et al. Effect of long-term application of biochar and straw on soil organic carbon in purple soil aggregates of sloping uplands[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(1): 96–103.]

[21] Gardner H R, Gardner W R. Relation of water application to evaporation and storage of soil water[J]. Soil Science Society of America Journal, 1969, 33(2): 192–196.

[22] 李新悦, 李冰, 莫太相, 等. 长期秸秆还田对水稻土团聚体及氮磷钾分配的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(9): 3257–3266. [Li Xinyue, Li Bing , Mo Taixiang, et al. Effects of long-term straw returning on distribution of aggregates and nitrogen, phosphorus and potassium in paddy[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(9):3257–3266.]

[23] 赵丽丽, 李陆生, 蔡焕杰, 等. 有机物料还田对土壤导水导气性的综合影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(6): 1045–1057. [Zhao Lili, Li Lusheng, Cai Huanjie, et al. Effects of organic materials returning to field on soil water and air conductivity[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(6): 1045–1057.]

[24] 彭正凯, 李玲玲, 谢军红, 等. 保护性耕作对陇中旱作农田水分特征的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(12): 4022–4028. [Peng Zhengkai, Li Lingling, Xie Junhong, et al. Effects of conservational tillage on water characteristics in dryland farm of central Gansu, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(12) : 4022–4028.]

[25] 孟庆英, 邹洪涛, 韩艳玉, 等. 秸秆还田量对土壤团聚体有机碳和玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 119–125. [Meng Qingying, Zou Hongtao, Han Yanyu, et al. Effects of straw returning amount on soil aggregate organic carbon and maize yield [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(23): 119–125.]

[26] 孙池涛, 邓亚鹏, 张俊鹏, 等. 秸秆覆盖条件下滨海土壤蒸发阻力模型研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 284–291. [Sun Chitao, Deng Yapeng, Zhang Junpeng, et al. Model on coastal soil evaporation resistance under straw coverage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 284–291.]

[27] 刘燕青, 王计磊, 李子忠. 秸秆覆盖对土壤水分和侵蚀的影响研究进展[J]. 水土保持研究, 2021, 28(6): 429–436. [Liu Yanqing, Wang Jilei, Li Zizhong. Research progress on effects of straw mulching on soil moisture and erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 28(6): 429–436.]

[28] Zhou Quan, Wang Longchang, Xing Yi, et al. Effects of Chinese milk vetch intercropped with rape under straw mulching on soil aggregate and organic carbon character[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(4): 1235–1242.

[29] 员学锋, 吴普特, 汪有科, 等. 免耕条件下秸秆覆盖保墒灌溉的土壤水、热及作物效应研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 22–26. [Yuan Xuefeng, Wu Pute, Wang Youke, et al. Effects of straw mulching on soil moisture and crops under no-tillage irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(7): 22–26.]

Effects of different short-term straw returning methods on soil structure and water content

ZHOU Yanli[1,2,3], WU Haimei[1,2,3], ZHOU Yandong[1,3,4], SHANG Xumin[1,2,3], PANG Lei[1,2,3]

(1. Key Laboratory of Arid Land Crop Science of Gansu Province, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 3. Experimental Teaching Center of Plant Production, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 4. College of Food Science and Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Soil structure and water content are key factors influencing crop production. The effects of different short-term straw returning measures on soil structure and water evaporation were analyzed via field experiment and using evaporation bucket simulation tests. Four treatments were used: control (CK), broken stalks returned to the field (T1), broken stalks returned to the field plus whole stalk cover (T2), and whole stalk cover (T3). The study found the following results: (1) for the 0−20 cm soil layer, T1, T2, and T3 decreased soil bulk density and increased soil capillary porosity but had significant effects on aggregates. The contents of large aggregates in T1 and T2 significantly increased by 36.90% and 63.06%, respectively, compared with CK ($P<0.05$). Moreover, large aggregate content in T3 decreased by 9.89% compared with that in CK. (2) T1, T2, and T3 may increase the average soil water content in the 0−60 cm soil layer and decrease the cumulative evaporation of soil water. The smallest cumulative evaporation was seen in T3, and no significant difference was observed between T2 and T3. Compared with CK, the transpiration inhibition rate of T2 and T3 was 3.65% and 4.13%, respectively. (3) Broken stalks returned to the field plus whole stalk cover had the best effect on improving soil structure and inhibiting soil water evaporation.

Keywords: straw broken stalk return to the field; whole straw mulch; soil physical structure; evaporation of soil water